UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

E.A.P DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

"APLICACION DE LA INVESTIGACION DE OPERACIONES AL PROBLEMA DE LA DISTRIBUCION A UNA EMPRESA DE LOGISTICA"

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial

AUTOR

Daniel Alberto Riveros Vásquez

Lima – Perú

2015

DEDICATORIA

A mis padres

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las organizaciones, independientemente del sector de actividad donde realizan sus operaciones y/o servicios, y de su tamaño, han de hacer frente a un mundo competente en los que han de conciliar la satisfacción de sus clientes con la eficiencia económica de sus actividades.

Un elemento clave en muchos sistemas de distribución (*Supply Chains*), es la secuenciación de los vehículos, a través del requerimiento de los clientes.

La empresa Logística de Distribución Supply Chains (LDSC), es una organización que está inmersa en un proceso de mejora en sus procesos, que le permite brindar un servicio de calidad a los clientes que solicitan la distribución de sus productos, es por ello que hace uso de los modelos y métodos o técnicas de la Investigación de Operaciones.

El campo de la aplicación de los modelos y técnicas de la Investigación de Operaciones (IO) es muy amplio, y la importancia de su aplicación en el campo de la distribución radica en la necesidad cada vez más exigente de la distribución óptima restringido al uso de los recursos escasos con que dispone.

El propósito del presente trabajo, es establecer las diferentes problemáticas de distribución de los productos que efectúa LDSC a los distintos puntos del país usando recursos escasos, lo que se verá reflejado en la eficiencia del recurso humano y la eficacia para la organización.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO III

ANÁLISIS SITUACIONAL Y RESULTADOS RELEVANTES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1 Antecedentes

La explosión combinatoria, es uno de los problemas computacionales a resolver en optimización combinatoria.

El problema de la distribución o ruteo de vehículos, es el nombre genérico dado a la clase de problemas en los que se debe determinar una serie de rutas para una flota de vehículos basados, en uno o más depósitos, para un cierto número de ciudades o clientes geográficamente dispersos. Es uno de los problemas de optimización combinatoria y programación no lineal más desafiante que existe por su complejidad y a la vez está comúnmente presente en aplicaciones industriales.

Esta aparece en situaciones cuando desde un conjunto de elementos se pueden obtener diferentes arreglos de estos, permitiendo una vasta cantidad de posibilidades o permutaciones. Situaciones muy comunes en problemas de gestión de distribución, diseño de circuitos integrados, balance de línea, entre otros.

Como un ejemplo está el problema del agente viajero o TSP (por sus siglas en inglés, *Traveling Salesman Problem*), en el donde se tiene que saliendo de un lugar y regresando al mismo después de haber visitado cada cliente una sola vez con el costo mínimo del viaje; es decir, si se tienen que recorrer, en total, n ciudades entonces existen $(n-1)!$ soluciones factibles, lo que resulta impráctico.

El TSP y otros problemas de distribución, son los que se enfrentan diariamente las Gerencias de Distribución, de las cadenas de abastecimiento; y en el medio, no existe empresa, que haya recurrido a las técnicas de optimización, como una forma diaria de gestionar esta problemática.

El Problema de Distribución surge naturalmente como el problema central en los campos de transporte, distribución y logística. En algunos mercados, transporte significa un alto porcentaje del valor agregado de los bienes. Es por esto que la utilización de métodos de optimización para el transporte resulta frecuentemente en ahorros significativos, variando entre un 5% y un 20% de los costos totales, como informan Toth y Vigo (2001).

1.1.2 Formulación del problema

La correcta valoración del cliente y la permanente búsqueda de la satisfacción de sus necesidades y expectativas, permite asumir el cambio cultural necesario para afrontar con éxito los actuales y futuros desafíos.

El sistema de planificación de la distribución en LDSC, está constituido por la flota de vehículos, que se encarga de la atención a los clientes repartidos en distintos puntos geográficos del país.

El conocimiento de los tiempos de desplazamiento, es importante puesto que una correcta secuenciación de las visitas o tours, conduce a una planeación realista sujeta a la restricción del tiempo, mejorando así la eficacia en el servicio.

Problema principal

¿El uso de la Investigación de Operaciones mejora la distribución en una empresa de logística?

Problema específico

¿Se puede establecer las rutas óptimas de distribución logística?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo principal

Mejorar la distribución en una empresa logística con el uso de la Investigación de Operaciones.

1.2.2 Objetivo específico

El objetivo específico que se plantea es:

- Establecer las rutas óptimas de distribución logística.

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

A continuación se presenta la justificación mediante los siguientes criterios:

Conveniencia

Generar una solución confiable, para una planificación muy cercana al óptimo.

Relevancia social

Mejorar la utilización de los recursos y como consecuencia de ello, contar una operación eficiente y económica en la gestión del personal de distribución de LDSC.

Implicancias prácticas

Investigar los problemas de distribución en las organizaciones en el rubro de la distribución.

Valor teórico

Sugerir recomendaciones o hipótesis para futuros estudios.

Utilidad metodológica

Considerar la orientación de las nuevas herramientas de optimización a los negocios, enfatizando el uso de la Investigación de Operaciones.

Ante la necesidad de plantear algoritmos, que ofrezcan respuestas a las múltiples empresas, que tienen la necesidad de distribuir sus productos, es que se plantea este trabajo haciendo uso de la Investigación de Operaciones, que analiza una serie de problemas en distribución, y desarrolla una solución computacional, que pueda ser utilizada para resolver el diario problema de cómo distribuir los productos a los clientes.

El presente trabajo de investigación es importante, porque contribuirá a la adecuada planificación del personal de distribución, en la atención a los clientes que se encuentran en distintos puntos geográficos de una localidad o región.

1.4 HIPÓTESIS Y VARIABLES

Hipótesis principal

Con el uso de la Investigación de Operaciones se mejora la distribución en una empresa logística.

Variable Independiente: Uso de la Investigación de Operaciones.

Variable Dependiente: Mejora la distribución en una empresa logística.

Hipótesis Específica

Con el uso de la Investigación de Operaciones se establece las rutas óptimas de distribución logística.

Variable Independiente.: Uso de la técnica de la Programación Matemática en Investigación de Operaciones.

Variable Dependiente: Rutas óptimas de distribución.

1.5 ALCANCES

El alcance para la presente investigación, se presenta a continuación:

Ser utilizado para la determinación de las rutas de distribución de los productos que efectúa la organización, hacia sus clientes. Corresponde a los puntos o localidades de entrega, en las diferentes localidades dentro del país.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

El problema de distribución de bienes o productos o en formalidades técnicas el problema del ruteo de vehículos o VRP (por sus siglas en inglés *Vehicle Routing Problem*), es el nombre genérico dado a la clase de problemas en los que se debe determinar una serie de rutas para un vehículo o una flota de vehículos basados en su lugar de partida (también conocido depósito), para un cierto número de lugares o clientes geográficamente dispersos. Es uno de los problemas de optimización combinatoria y programación no lineal más importantes en las organizaciones en los momentos actuales.

El transporte es un área de decisiones clave en logística. Dejando a un lado el costo de inversión, un alto porcentaje en los costos en logística son absorbidos en distribución. Las decisiones en distribución son: diseño de la ruta, la programación de los vehículos y la consolidación del envío (Ballou, 2004).

En McGinnis (1990), la selección de un modo de servicio que incluya el uso de transporte depende entre otras de las siguientes características:

- Tarifas de flete.
- Seguridad o confiabilidad.

- Tiempo en tránsito.
- Pérdidas, daños, procesamiento de quejas, reclamaciones y rastreo.

Los VRP son uno de los problemas más conocidos y desafiantes en la programación entera, esto es, porque estos problemas no se pueden resolver en tiempo polinomial en función del tamaño de la entrada.

El esfuerzo computacional requerido para resolver este problema aumenta en una forma que no se puede expresar por un polinomio, sino por una función exponencial. Cuando es el caso de una entrada grande de localidades, es a menudo deseable obtener soluciones aproximadas, para que puedan ser encontradas lo bastantemente rápido y que sean suficientemente exactas para su propósito. Usualmente esta tarea es lograda usando métodos heurísticos.

El TSP, es un ejemplo que muestra y analiza la problemática que subyace tras algunos tipos de problemas matemáticos que a priori parecen tener una solución relativamente fácil y en la práctica presentan una gran dificultad.

Se conoce la forma de resolverlo pero sólo en teoría, en la práctica la solución no es aplicable debido al tiempo de computación que se precisa para obtener su resultado.

2.1 INVESTIGACIONES RELACIONADAS CON EL ESTUDIO

Karl Menger (1930) plantea por primera vez el TSP el modelo matemático del TSP. Menger planteaba que el problema de determinar rutas de distancia mínima entre dos localidades era encontrar ciclos Hamiltonianos de distancia mínima.

Posteriormente George B. Dantzig, conocido como el padre de la Programación Lineal, se interesó en el TSP y junto con Fulkerson y Johnson, relajaron el problema combinatorio (binario) a uno de variables continuas con la restricción de estar entre 0 y 1, con ello el problema es uno de Programación Lineal (PL). Utilizando el método simplex (desarrollado por el George B. Dantzig), encontraron que el TSP podía ser resuelto en forma computacional. Sin embargo, al crecer el número de puntos o localidades, el problema se volvía inviable computacionalmente hablando. El problema resuelto por Dantzig y Fulkerson estaba constituido por 49 localidades [3].

Posteriormente S. Lin y B. Kernighan (1973) plantean "*An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem*", en *Operations Research* 21 [8]. En este trabajo se discute un procedimiento heurístico muy eficaz para generar soluciones óptimas y cercanas al óptimo. El procedimiento se basa en un enfoque general a la heurística que tiene una amplia aplicación en problemas de optimización combinatoria. El procedimiento genera soluciones óptimas para todos los problemas analizados, problemas «clásicos» que aparecen en la literatura, así como los problemas generados con pruebas al azar, hasta 110 ciudades [4].

En las siguientes décadas, el problema fue investigado por matemáticos, físicos, químicos y científicos de la computación.

Grandes progresos fueron hechos en los años de 1970 y 1980, con Grötschel, Padberg, Rinaldi y otros que resolvieron problemas exactos hasta con 2392 ciudades, usando las técnicas de planos de corte y Branch & Bound [4].

En 1994, Robert Bixby, Willian Cook and Dave Applegate del Departamento de Computación y Matemáticas Aplicadas de Rice University en Houston, para probar la eficacia de Cplex, y poder comercializar el producto, crearon un programa específico para el TSP denominado Concorde. Los resultados impresionantes que lograron con su código fueron tales que llamaron la atención de la comunidad en optimización y desde hace 15 años el Concorde se ha usado para resolver una enorme cantidad de aplicaciones. En pocas palabras el agente viajero usa el Concorde. Bixby había desarrollado en años anteriores, un paquete computacional llamado Cplex para problemas de optimización combinatoria. Los programas son rutinas en C++ de algoritmos de Programación Lineal usando puntos interiores, planos de corte y heurísticas [4].

En 2000, Keld Helsgaun presenta "*An effective implementation of the Lin-kernighan traveling salesman heuristic*" (*European Journal of Operations Research 12*), probando la implementación para 7,397 ciudades (el más largo problema no trivial) y su extensión a 85,800 ciudades con óptimos desconocidos [10].

En 2005, Cook y otros calcularon un tour óptimo con 33,810 ciudades.

En 2006, Keld Helsgaun presenta "*An Effective Implementation of K-opt Moves for the Lin-Kernighan TSP*", probando la efectividad en un rango de 10,000 a 1, 000,000 de ciudades [10].

Los Problemas de distribución o de Enrutamiento de Vehículos, son problemas de optimización combinatoria y pertenecen, en su mayoría, a la clase **NP**. La motivación académica por resolverlos radica en que no es posible construir algoritmos que en tiempo polinomial, resuelvan cualquier instancia del problema [8].

En la literatura, una heurística, para un simple *depot* u origen VRP, es el conocido algoritmo de Clarke y Wright, este es un algoritmo tipo de Ahorros. La idea es muy sencilla; considere un *depot* D, y n puntos de demandas. El total de la longitud del tour de esta solución, es obviamente $2\sum_{i=1}^{n} d(D,i)$ [8].

El Algoritmo de Ahorros en Paralelo o PSA (Parallel Savings Problem), se aplica al problema del reparto. La idea del ahorro, introducida por Clarke y Wright; tiene su principal cambio, el de reemplazar el procedimiento secuencial, y de mezcla de simple tour, por un procedimiento en paralelo, basado en el problema del Matching. Este algoritmo, mezcla múltiple soluciones parciales, en cada iteración. Sus autores son K. Altinkenmer, y B. Gavish [8].

Existen otras heurísticas, para VRP, allí se encuentran, la de Inserción: Mole & Jameson, Christofides, Mingozzy y Toth. La de Asignar Primero-Rutear Después: de Barrido o *Sweep*, de Asignación Generalizada de Fisher y Jaikumar, de Localización de Braniel y Simchi-Levi. Método de Rutear-Asignar Después. Algoritmos de Pétalos. Algoritmos de Búsqueda Local: operador λ-intercambio, algoritmo de Lin-Kernigham, operador Or-opt, Operadores de Van Breedam, GENI y GENIUS, y de Transferencias Cíclicas [8].

2.2 BASES TEORICAS ESPECIALIZADAS SOBRE EL TEMA

2.2.1 Conceptos en optimización

Una jerarquía problemas ha emergido, junto con una correspondiente colección de técnicas para su solución. Estos problemas, son conocidos como el problema de la programación matemática, donde se encuentra el valor de x, tal que:

$$\begin{aligned}
&\min f(x_1, x_2, ..., x_n) \\
&\text{sujeto a} \\
&g_i(x_1, x_2, ..., x_n) \geq= b_i, \quad i = 1, ..., m \\
&h_j(x) = 0, \qquad\qquad\quad j = 1, ..., p
\end{aligned}$$

Donde $f(\boldsymbol{x}), g(\boldsymbol{x}), h(\boldsymbol{x})$, son funciones generales del parámetro $\boldsymbol{x} \in \mathcal{R}^n$. Las técnicas para resolver tales problemas son siempre iterativas, por naturaleza, y su convergencia es estudiada usando matemáticas del mundo real.

Si la restricción no existe, o es una restricción de igualdad, con menor o igual número de variables que la función objetivo entonces, el cálculo diferencial, da la respuesta, ya que solo se trata de buscar los valores extremos de la función.

En el caso de las restricciones como la función objetivo son lineales se encuentra en el campo de la Programación Lineal, la existencia de máximo o mínimo, está asegurada, y el problema se reduce a la aplicación de algoritmos de álgebra lineal, tales como el Método Simplex y Método Dual. En el caso de la Programación No Lineal, existen las llamadas condiciones de Khun-Tucker, las cuales en algunos casos, pueden ser utilizadas para poder encontrar puntos críticos, máximos o mínimos.

Existen diferencias geométricas entre los programas no lineales y los programas lineales.

Aquí se distinguen, dos tipos de soluciones: un óptimo local que está en un lado, y un punto global que se encuentra en el otro lado del punto conocido como óptimo. Un óptimo local, es un óptimo con respecto a la solución factible en una región cerrada en dicho punto. Se formaliza estas dos clases de óptimos, mediante la siguiente definición.

Definición. Sea $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$, una solución factible a un problema de minimización, con una función objetivo $f(x)$; se llama x a:

1. Un mínimo global, si $f(x) \leq f(y)$, para cada punto factible $y = (y_1, y_2, ..., y_n)$;
2. Un mínimo local, si $f(x) \leq f(y)$, para cada punto factible $y = (y_1, y_2, ..., y_n)$, suficiente cerrado a x. Esto es, si existe un número $\varepsilon > 0$, muy pequeño, tal que cada variable y_j, cumple con $x_j - \varepsilon \leq y_j \leq x_j + \varepsilon$, *y* es factible, entonces $f(x) \leq f(y)$.

El concepto de mínimo local, es muy importante. Muchos procedimientos en programación no lineal de propósito general, sólo determinan el mínimo local [11].

2.2.2 Complejidad computacional

La complejidad computacional estudia el esfuerzo o costo de la resolución de un problema. El esfuerzo necesario para resolver un problema de forma eficiente puede variar enormemente.

Cuando se resuelve un problema, se busca la mejor solución entre un conjunto de posibles soluciones. Al conjunto de todas las posibles soluciones a un problema concreto se llama espacio de búsqueda.

La búsqueda de una solución, se reduce a buscar el valor extremo, mínimo o máximo, en el espacio de búsqueda. Este espacio de búsqueda a veces puede ser bien definido, pero en la mayoría de las ocasiones sólo se tiene el conocimiento de algunos puntos en ese espacio.

Al plantearse un problema concreto, se encuentra una serie de algoritmos que se pueden aplicar para resolverlo. Se suele decir que el orden de complejidad de un problema es el del mejor algoritmo que se conozca para resolverlo. Así se clasifican los problemas y los estudios sobre algoritmos que se aplican a la realidad.

En el tiempo han aparecido diversos estudios, que han llevado a la constatación de que existen problemas muy difíciles, problemas que desafían la utilización de las computadoras para resolverlos.

La cuestión es que existen, por una parte, problemas resolubles de manera determinista mediante algoritmos polinomiales y en un tiempo polinomial, como puede ser, por ejemplo la resolución de ecuaciones, la realización de sumas, productos, y otras operaciones., pudiendo limitar el tiempo de resolución, más o menos largo, de una manera aceptable. Estos son los problemas P [11].

Los algoritmos de complejidad polinomial, se dice que son tratables, en el sentido de que suelen ser abordables en la práctica. Los problemas para los que se conocen algoritmos con esta complejidad, se dice que forman la clase P. Aquellos problemas para los que la mejor solución que se conoce es de complejidad superior a la polinomial, se dice que son problemas intratables. Sería interesante encontrar alguna solución polinomial (o mejor) que permitiera abordarlos.

Sin embargo, también existen problemas NP que pueden resolverse de forma no determinista, probando una solución conjeturada. Esta comprobación es de una gran rapidez en comparación con el tiempo polinomial necesario en general para la resolución determinista de los problemas P.

Algunos de estos problemas intratables, pueden caracterizarse por el curioso hecho de que puede aplicarse un algoritmo polinomial, para comprobar si una posible solución es válida o no. Esta característica lleva a un método de resolución no determinista consistente en aplicar heurísticos para obtener soluciones hipotéticas que se van desestimando (o aceptando) a ritmo polinomial. Los problemas de esta clase se denominan NP (la N de no-deterministas y la P de polinomial) [11].

Se conoce una amplia variedad de problemas de tipo NP, de los cuales destacan algunos de ellos de extrema complejidad. Gráficamente se puede decir que algunos problemas se hayan en la "frontera externa" de la clase NP. Son problemas NP, y son los peores problemas posibles de clase NP. Estos problemas se caracterizan por ser todos "iguales" en el sentido de que si se descubriera una solución P para alguno de ellos, esta solución sería fácilmente aplicable a todos ellos.

Se puede afirmar que los problemas fáciles están en P (y en NP), pero los difíciles de verdad, *sólo* están en NP y se llaman NP-completos.

Es más, si se descubriera una solución para los problemas NP-completos, esta sería aplicable a todos los problemas NP y, por tanto, la clase NP desaparecería del mundo científico al carecerse de problemas de ese tipo.

Una alternativa para resolver los problemas NP-completos son las denominadas metaheurística, como los algoritmos genéticos. Ejemplos de problemas NP-completos son el problema del agente viajero (TSP), el problema del coloreamiento de un grafo, entre otros.

2.2.3 Soluciones aproximadas

En la actualidad, todos los algoritmos conocidos para problemas NP-completos utilizan tiempo exponencial, con respecto al tamaño de la entrada. Se desconoce si hay algoritmos más rápidos, por lo cual, para resolver un problema NP-completo de tamaño arbitrario, se utiliza uno de los siguientes enfoques:

- **Aproximación**: Un algoritmo que rápidamente encuentra una solución no necesariamente óptima, pero dentro de un cierto rango de error. En algunos casos, encontrar una buena aproximación es suficiente para resolver el problema, pero no todos los problemas NP-completos tienen algoritmos de aproximación.

- **Probabilística**: Un algoritmo probabilístico utiliza aleatoriedad para obtener en promedio una buena solución al problema planteado con una pequeña probabilidad de fallar, para una distribución dada de los datos de entrada.
- **Restricciones**: Restringiendo la estructura de las entradas se pueden encontrar algoritmos más rápidos.
- **Casos particulares**: Puede ocurrir que se reconozcan casos particulares del problema para los cuales existen soluciones rápidas.
- **Heurísticas**: Un algoritmo que trabaja razonablemente bien en muchos casos. En general son rápidos, pero no existe medida de la calidad de la respuesta.

Las aproximaciones Metaheurísticas suelen ser empleadas. Un ejemplo de algoritmo heurístico de complejidad O(n log n) es el algoritmo voraz, utilizado para la coloración de vértices, en algunos compiladores [4].

Desde su origen, la programación matemática, se encuentra abocada en problemas para los que no existe método analítico alguno que permita obtener, con seguridad y en un tiempo conveniente, el óptimo teórico. Éste es, por ejemplo, el caso de los problemas combinatorios en que el sentido común da por imposible la enumeración. Es más que normal que el tamaño y la naturaleza de ciertos problemas combinatorios nos prohibían abordarlos por la vía del sentido común. Nuestro buen sentido, educado por la ciencia, sabe distinguir particularmente los problemas NP completos, para los cuales no existe un algoritmo que en tiempo polinomial sea capaz de encontrar la solución [11] .

Desde la investigación de Operaciones se ha establecido, por esas razones, métodos denominados heurísticos, que no proporcionan el óptimo formal, pero susceptibles de llegar a soluciones buenas, tanto más fiables en cuanto que permiten determinar al mismo tiempo una cota superior o inferior del óptimo teórico con el que se comparan [11].

Con el auge de las computadoras, hacia principios de los ochenta, estos métodos han ido ganando terreno, puesto que se iba haciendo, cada vez más, factible y fácil intentar diferentes heurísticas y juzgar su eficacia relativa.

Durante los últimos años han aparecido una serie de técnicas, denominadas metaheurìsticas, cuya finalidad es la de encontrar buenas soluciones a problemas de optimización (lineal o no lineal y con o sin restricciones) [4].

Entre ellas se pueden enumerar los algoritmos genéticos, el recocido simulado, la búsqueda tabú, entre otras. Su aplicación a los problemas de secuenciación de todo tipo es una finalidad típica y clásica. Es más, prácticamente todas ellas están basadas en intentar resolver, de la mejor forma posible, problemas típicos de organización de la producción.

Así, los problemas típicos de secuenciación de trabajos en máquinas, de asignación de rutas, planificación de la producción, han sido, son y, casi con toda seguridad, serán el banco de pruebas de las más modernas técnicas de búsqueda de soluciones a problemas en los que, de entrada, se sacrifica la posibilidad de encontrar la solución óptima [4].

Los Algoritmos Genéticos (GA, del inglés *Genetic Algorithms*) fueron introducidos por John H. Holland en 1975, para imitar algunos de los mecanismos que se observan en la evolución de la naturaleza. Estos mecanismos no son conocidos en profundidad pero sí algunas de sus características: la evolución ocurre en los cromosomas; un ser vivo da vida a otro, mediante la decodificación de los cromosomas de sus progenitores, el cruce de los mismos, y la codificación de los nuevos cromosomas formando los descendientes [5].

Las mejores características de los padres se trasladan a los hijos, mejorando progresivamente las generaciones.

La resolución de un problema, es la búsqueda de una solución óptima en un gran espacio de soluciones. De la misma manera la naturaleza se enfrenta al mismo dilema en la búsqueda de la mejor adaptación de los individuos al medio. Los integrantes de una población compiten entre ellos en la búsqueda de la supervivencia. Aquellos miembros de la población capaces de adaptarse mejor al medio que les rodean, tendrán mayor oportunidad de sobrevivir. Por otro los integrantes de la población con menos capacidades, tendrán una oportunidad menor de sobrevivir [4].

En el proceso de reproducción, los padres transmiten a sus hijos parte de su carga genética. En este cruce los individuos descendientes poseerán características del fenotipo de sus ancestros. Debido a que los individuos mejor dotados poseerán mayor descendencia, las sucesivas generaciones disfrutarán de la combinación de las buenas características de generaciones pasadas, lo que se traducirá en una mejor adaptación al medio.

Para aplicar GA a un determinado problema, el primer paso consiste en codificar el cromosoma artificial. Estos pueden ser cadenas de unos y ceros, lista de parámetros, etc. Luego existe un procedimiento para discriminar las soluciones buenas de las malas. Es la función de evaluación o función de *fitness*, que es usada por GA para guiar la evolución de las nuevas generaciones. Momento que se está con las condiciones de evolucionar soluciones para el problema [5].

GA es método para resolver problemas de optimización que está basado en la selección natural, el proceso que dirige la evolución biológica. El GA repetidamente modifica soluciones de poblaciones individuales. En cada paso, el GA selecciona aleatoriamente individuos desde la actual población produciendo los hijos de la nueva generación. Sobre sucesivas generaciones, la población se dirige a la solución óptima [5].

La técnica GA difiere de la optimización tradicional porque: genera una población de puntos (no un punto); y selecciona la siguiente población utilizando cambios aleatorios (en vez de conseguir un nuevo punto, desde procedimientos determinísticos).

2.2.4 Modelos VRP

En los modelos de distribución, la función objetivo depende de la tipología y características del problema. Las situaciones más comunes se encuentran en:

- Minimizar el coste total de operación.
- Minimizar el tiempo total de transporte.
- Minimizar la distancia total recorrida.
- Minimizar el tiempo de espera.
- Maximizar el beneficio.
- Maximizar el servicio al cliente.
- Minimizar la utilización de vehículos.
- Equilibrar la utilización de los recursos.

En las aplicaciones logísticas, los VRP aparecen con muchas restricciones especiales, aparte de las ya nombradas. Esto crea toda una clasificación desde variantes al problema original. Algunas de las principales son:

a) El problema del vendedor viajero (TSP)

b) Cada vehículo tiene una capacidad limitada (Capacitated VRP - CVRP)
c) Cada cliente tiene que ser atendido dentro de una cierta ventana de tiempo (VRP with Time Windows - VRPTW)
d) El vendedor usa varios depósitos para abastecer a los clientes (Multiple Depot VRP - MDVRP)
e) Los clientes tienen la opción de devolver algunos bienes al depósito (VRP with Pick-Up and Delivering - VRPPD)
f) Los clientes pueden ser abastecidos por distintos vehículos (Split Delivery VRP - SDVRP)
g) Algunos valores (como número de clientes, sus demandas, tiempo de servicio o tiempo de viaje) son aleatorios (Stochastic VRP - SVRP)
h) Los pedidos pueden ser llevados sólo en ciertos días (Periodic VRP - PVRP)

El problema del vendedor viajero es uno de los problemas más conocidos y estudiado en el campo de la optimización combinatoria computacional. A pesar de la aparente sencillez de su planteamiento, el TSP es uno de los más complejos de resolver y existen demostraciones que equiparan la complejidad de su solución a la de otros problemas aparentemente mucho más complejos que han retado a los matemáticos desde hace siglos [5].

2.3 MARCO CONCEPTUAL

ADMINISTRACIÓN: Conjunto ordenado y sistematizado de principios, técnicas y prácticas que tiene como finalidad apoyar la consecución de los objetivos de una organización a través de la provisión de los medios necesarios para obtener los resultados con la mayor eficiencia, eficacia y congruencia; así como la óptima coordinación y aprovechamiento del personal y los recursos técnicos, materiales y financieros.

ANÁLISIS: Descomposición del todo en sus partes para extraer conocimiento.

ALTERNATIVA: Ver solución.

ALELO: Valor que puede adoptar un gen.

CLIENTE: Es quien accede a un producto o servicio por medio de una transacción financiera (dinero) u otro medio de pago. Quien compra, es el comprador, y quien consume el consumidor.

CONTROLAR: Acto de medir y registrar los resultados alcanzados por un agente del sistema organizacional en un tiempo y espacio determinados.

EFECTIVIDAD: Cumplimiento al ciento por ciento de los objetivos planteados.

EFICACIA: Capacidad de lograr los objetivos y metas programadas con los recursos disponibles en un tiempo predeterminado.

Capacidad para cumplir en el lugar, tiempo, calidad y cantidad las metas y objetivos establecidos.

EFICIENCIA: Uso racional de los medios con que se cuenta para alcanzar un objetivo predeterminado; es el requisito para evitar o cancelar dispendios y errores.

Capacidad de alcanzar los objetivos y metas programadas con el mínimo de recursos disponibles y tiempo, logrando su optimización.

ENFOQUE AL CLIENTE: Método de Gestión, basado en identificar y desplegar internamente los requisitos cuyo desarrollo satisface las necesidades y expectativas de los clientes, y en priorizar coherentemente los procesos de la organización que repercuten en su satisfacción.

ESPACIO DE SOLUCIONES: Conjunto de todas las posibles soluciones a un problema determinado que es posible alcanzar con el sistema de resolución empleado. Equivale a espacio de individuos.

EXPERIMENTACIÓN: Observación provocada.

FENOTIPO: Características físicas de un individuo determinadas por su genotipo y las condiciones del medio externo.

FUNCION: Mandato formal permanente e impersonal de una organización o de un puesto de trabajo.

HIPÓTESIS: Antecedente de una proposición condicional o hipotética. Enunciado que sólo se puede probar por sus consecuencias.

MEDIO EXTERNO: Entorno en el que se desarrollan y compiten los individuos. En el presente trabajo será análogo al dominio de ubicación de las actividades.

META: Es la cuantificación del objetivo que se pretende alcanzar en un tiempo señalado, con los recursos necesarios.

MÉTODO: Proceso o camino sistemático establecido para realizar una tarea o trabajo con el fin de alcanzar un objetivo predeterminado.

MÉTODO CIENTÍFICO: Sigue la definición tradicional del método científico. Se enuncia una hipótesis, esta se intenta comprobar mediante la realización de una prueba, controlando las variables.

METODOLOGÍA: Parte de la lógica que estudia los métodos (y sus formas lógicas especiales) para la investigación.

MODELAMIENTO: Tipo de aprendizaje en el que una persona aprende observando el comportamiento deseado en otras personas.

MODELO: Descripción simplificada y práctica del funcionamiento de algo.

OBJETIVO: Expresión cualitativa de un propósito en un periodo determinado; el objetivo debe responder a la pregunta "qué" y "para qué".

PROCESO: Un conjunto de acciones integradas y dirigidas hacia un fin. Una acción continua u operación o serie de cambios o tareas que ocurren de manera definida. La acción y el efecto de continuar de avanzar, en especial del tiempo.

PROCESO DE MEJORA: Proceso sistemático de adecuación de la organización a las nuevas y cambiantes necesidades y expectativas de clientes y otras partes interesadas, realizada mediante la identificación de oportunidades de mejora, y la priorización y ejecución de proyectos de mejora.

SATISFACCIÓN DEL CLIENTE: Percepción del cliente sobre el grado en que se han cumplido sus requisitos.

SISTEMA: Conjunto de procesos o elementos interconectados e interdependientes que forman un todo complejo.

SOLUCION: Configuración compatible con las restricciones del problema y que le da la solución.

SOLUCIÓN ÓPTIMA: Solución s $\in$ S, tal que la función objeto *f*(s) sea óptima. Analógicamente, el individuo mejor adaptado a su entorno.

SOLUCIÓN SUB ÓPTIMA: Solución de calidad cercana a la de la solución óptima, o bien de calidad aceptable para las condiciones del problema planteado.

2.4 PRESENTACION Y DESARROLLO DE LOS MODELOS

El problema del agente viajero tiene el planteamiento siguiente: un vendedor que quiere encontrar la ruta más corta posible, partiendo desde su casa y llegando a la misma, y visitando a todos sus clientes sólo una vez, es decir sin pasar dos veces por el mismo punto.

Desde el punto de vista práctico, el problema no está resuelto y desde el punto de vista teórico, las técnicas empleadas son sólo aproximaciones. No suponen una resolución real del TSP y sólo ofrecen soluciones aproximadas suficientemente aceptables.

La solución más directa es la que aplica la fuerza bruta: evaluar todas las posibles combinaciones de recorridos y quedarse con aquella cuyo trazado utiliza la menor distancia. El problema reside en el número de posibles combinaciones que viene dado por el factorial del número de ciudades (N!) y esto hace que la solución por fuerza bruta sea impracticable para valores de N incluso moderados con los medios computacionales actualmente a nuestro alcance. Por ejemplo, si una computadora fuese capaz de calcular la longitud de cada combinación en un microsegundo, tardaría algo más 3 segundos en resolver el problema para 10 ciudades, algo más de medio minuto en resolver el problema para 11 ciudades y... 77.146 años en resolver el problema para sólo 20 ciudades [3].

Un agente viajero desea recorrer “n” ciudades, se conoce las distancias, tiempos o costo de recorrer cada par de ciudades.

El problema consiste en hallar una ruta que partiendo desde su lugar de residencia pase por cada ciudad una sola vez y regrese al lugar donde se encontraba inicialmente, utizando la menor distancia posible, el menor tiempo o el menor costo de recorrer las “n” ciudades.

Existe un punto de partida (el nodo 0), no existe demandas en las ciudades visitadas y no hay restricciones temporales.

El problema puede formularse como:

$$\min z = \sum_{(i,j)\in A} c_{ij} x_{ij}$$

$$s.a:$$

$$\sum_{(i,j)\in A} x_{ij} = 1, \qquad \forall i \in V$$

$$\sum_{(i,j)\in A} x_{ij} = 1, \qquad \forall j \in V$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}$$

El primer juego de restricciones expresa que exactamente sale un arco de cada nodo (ciudad o vértice); y el segundo conjunto de restricciones expresa que exactamente llega un arco a cada nodo [3].

Este problema tal como se presenta, no captura todas las restricciones de un TSP (*Traveling Salesman Problem*).

Así presentado es un Problema de Asignación; es decir un TSP es un Problema de Asignación, pero no todo Problema de Asignación es un TSP.

En Dantzig y asociados [3], proponen una formulación donde las variables binarias x_{ij} indican el arco $(i, j) \in A$ utilizado en la solución. El conjunto V es el conjunto de todos los nodos, donde se encuentran *i* y *j*.

El problema del VRP capacitado, es una extensión del clásico problema del agente viajero (TSP), en que las rutas permitidas son limitadas por la necesidad de que los bienes deben ser entregados desde un punto origen o fuente hasta su destino por un vehículo de capacidad capacitada o finita.

En este tipo de problema, se cuenta con un centro de origen o depósito, "*n*" vehículos con capacidad definida para cada uno. Estos deben salir y regresar al depósito después de cumplir una secuencia de visita a clientes que se debe definir. Las restricciones que se deben tener en cuenta son las de visitar a todos los clientes una vez, satisfacer la demanda total y no sobrepasar la capacidad de carga máxima de cada vehículo.

El objetivo es minimizar la flota de vehículos y la suma del tiempo de viaje, y a la vez la demanda total para cada ruta no puede exceder la capacidad del vehículo que realiza esa ruta.

Una solución es factible si la cantidad total asignada a cada ruta no excede la capacidad del vehículo que realizará la ruta.

Algunos de los trabajos relacionados son por ejemplo, *The Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), en este problema se tiene un conjunto de puntos en un espacio métrico, un grupo de vehículos de cierta capacidad y una colección de rutas de vehículos empezando en un origen, los cuales cada uno deben visitar un punto determinado. Otro de los trabajos es *The Precedence-Constrained* TSP que implica la existencia de un número finito de puntos que se deben visitar antes de visitar un punto definido. Estos problemas son muy importantes, y las soluciones planteadas son muy interesantes [8].

La formulación del problema, según Toth y Vigo es como sigue:

$$Min\ z = \sum_{i=1}^{n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} c_{ij} x_{ij}$$

Siendo n el número de poblaciones y m el número de vehículos.

Sujeto a las siguientes restricciones:

No pueden salir más vehículos de los que hay.

$$\sum_{j=2}^{n} x_{1j} \leq m$$

El número de vehículos que salen del punto 1, es el mismo que el número que vuelven:

$$\sum_{i=2}^{n} x_{i1} = \sum_{j=2}^{n} x_{1j}$$

Respetar la capacidad máxima y evitar subciclos.

$$u_i - u_i + Q.x_{ij} \leq Q - d_i, \forall i \neq j, i, j \in \{2, \dots, n\}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, u \ \in R^+$$

CAPÍTULO III

ANALISIS SITUACIONAL Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de los modelos de ruta de vehículos; es decir, se identifica la ruta de la distribución de los pedidos de los clientes, mediante la propuesta del problema del agente viajero, enrutamiento de vehículos, entre otros.

3.1 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

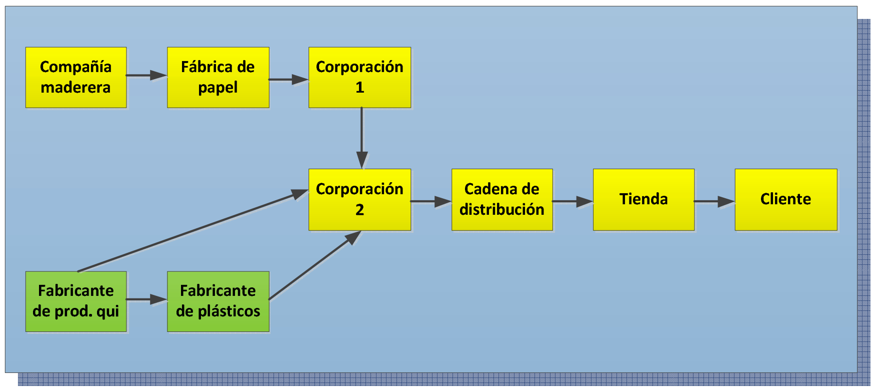
3.1.1 Cadenas de Abastecimiento

La Logística Integral también denominada Cadena de Abastecimiento o SCM (del inglés *Supply Chain Management*) se compone de todas las partes involucradas, directa o indirectamente, para satisfacer la petición de un cliente. La SCM incluye no sólo al fabricante y los proveedores, sino también a los transportistas, almacenistas, vendedores al detalle (menudeo), e incluso a los clientes mismos (Chopra, 2013) [2].

El proceso de la SCM se inicia con la llegada del cliente a la Corporación 2 y su necesidad por el artículo. La siguiente etapa de la SCM es la tienda que el cliente visita. La organización llena sus estantes de productos con base a inventarios, que puede abastecer un almacén de productos terminados, o por un distribuidor que empleó camiones por terceros. Al distribuidor a su vez le abastece el fabricante o una corporación

1. La planta recibe la materia prima de distintos proveedores, quienes a su vez pudieron ser abastecidos por otros proveedores (ver la figura 3.1).

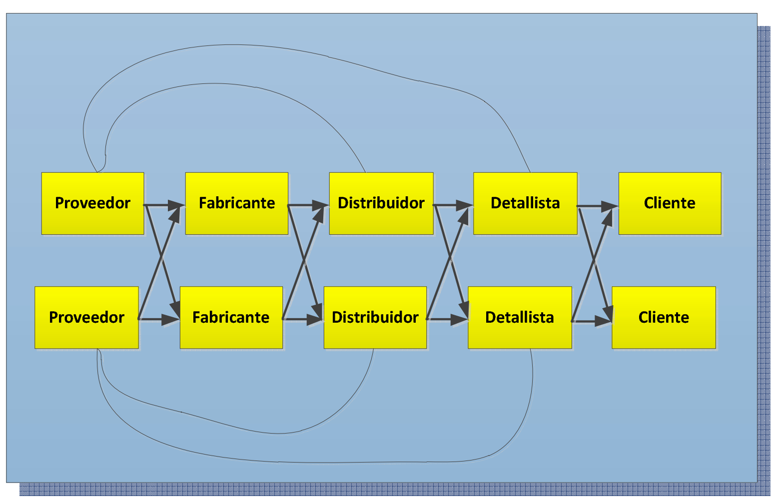
Figura 3.1: Etapas de la SCM de un producto



Fuente: Adaptado de Chopra (2013)

Una SCM es dinámica e implica el flujo constante de información, productos y fondos entre diferentes etapas (Chopra, 2013) [2].

Figura 3.2: Etapas de la SCM

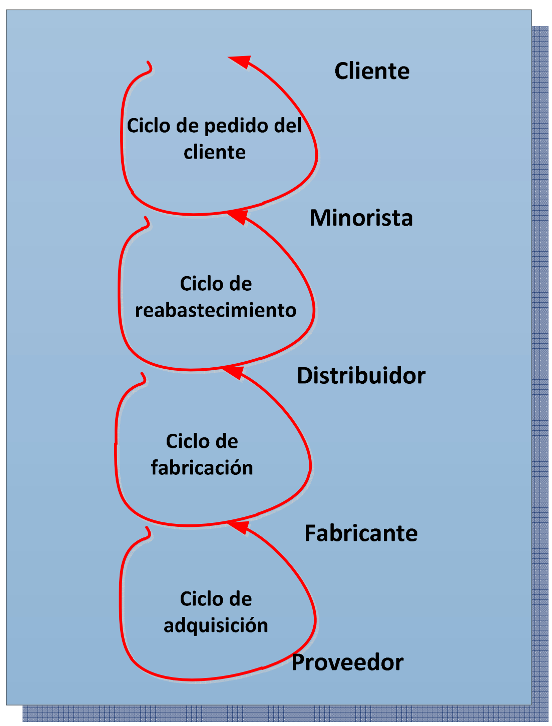


Fuente: Adaptado de Chopra (2013)

Como se observa el cliente es una parte integral del SCM. De hecho, el propósito primordial de cualquier SCM es satisfacer las necesidades del cliente y, en el proceso, generar una ganancia para sí misma.

La mayoría de las SCM son redes. El término Redes de Suministro quizás sea el más adecuado para describir la estructura que se compone de: Clientes, Detallistas, Mayoristas y distribuidores, Fabricantes y Proveedores de componentes y materias primas (Chopra, 2013). Ver la figura 3.2.

Figura 3.3: Ciclos del proceso en una SCM



Fuente: Adaptado de Chopra (2013)

Las cinco etapas de una SCM dan origen a cuatro ciclos de proceso, tal como se presenta en la figura 3.3.

La distribución se refiere a los pasos para trasladar y almacenar un producto desde la etapa del proveedor a una etapa de cliente en la SCM. La distribución ocurre entre cada par de etapas en la SCM. La materia prima y los componentes se trasladan de los proveedores a los fabricantes, en tanto que los productos terminados se trasladan del fabricante al consumidor final. La distribución es un indicador clave de la rentabilidad total de una organización. Porque afecta directamente tanto el costo de la SCM como el valor para el cliente. En a India, el costo de la distribución de salida del cemento es de casi 30% del costo de producirlo y venderlo (Chopra, 2013).

3.1.2 La empresa LDSC

La empresa LDSC inicio sus operaciones en año 1970 con el nombre de LOGISTIC S.A. Desde hace 50 años la empresa se caracteriza por ser una de las mejores Operadoras Logísticas en el Perú, brindando a los clientes servicios de excelente calidad [12].

En los años 80 se compró un terreno en el distrito Ate Vitarte y posteriormente se instaló las primeras maquinarias destinadas a procesar los servicios en forma automatizada.

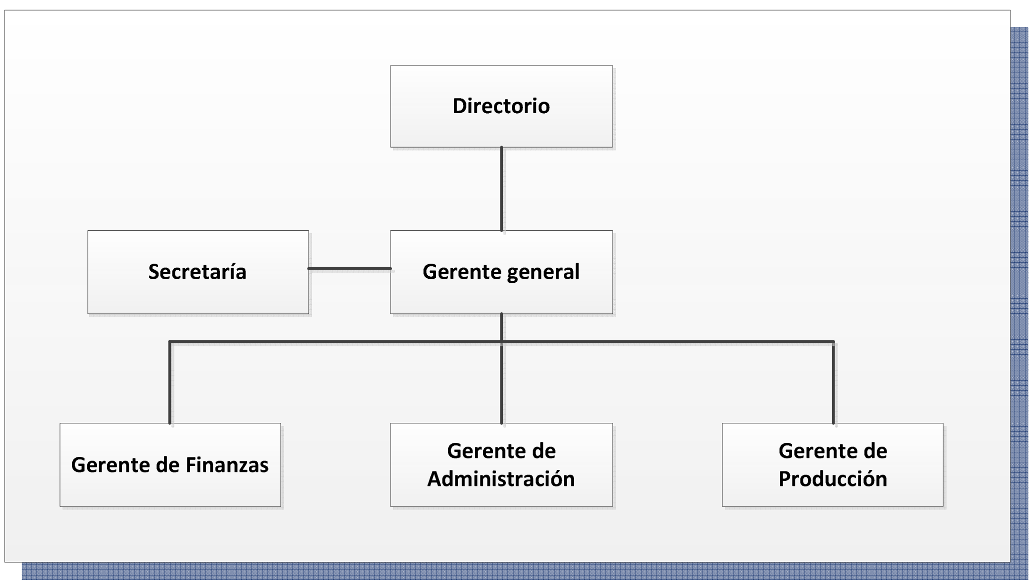
En el año1990 se cambia de razón social a LDSC y la empresa deja de llamarse LOGISTIC S.A.

En el año 2004, ingresa a una nueva etapa de calidad total y obtiene los certificados HACCP de Aseguramiento de la Calidad para todas las plantas.

En el año 2005, para hacer más eficiente el acarreo y despacho de nuestros servicios se construye una moderna cámara de despacho.

En el año 2012, ingresa a una nueva etapa de calidad total y obtiene a certificación ISO 9001:2008 de Sistema de Gestión a la Calidad para todos los procesos de la planta.

Figura 3.4: Organigrama de LDSC



Fuente: Empresa LDSC

La organización LDSC pertenece a un grupo de inversionistas peruanos con un directorio conformado por capitales nacionales. La empresa es liderada por un Gerente general (ver figura 3.4), con tres gerencias: de

Finanzas, Administración y Producción. La empresa cuenta con 850 trabajadores

3.2 DESCRIPCION DEL PROBLEMA

En los procesos logísticos, los vehículos de LDSC, visitan a los clientes para efectuar la entrega de los pedidos.

Figura 3.4: Mapa de Lima metropolitana

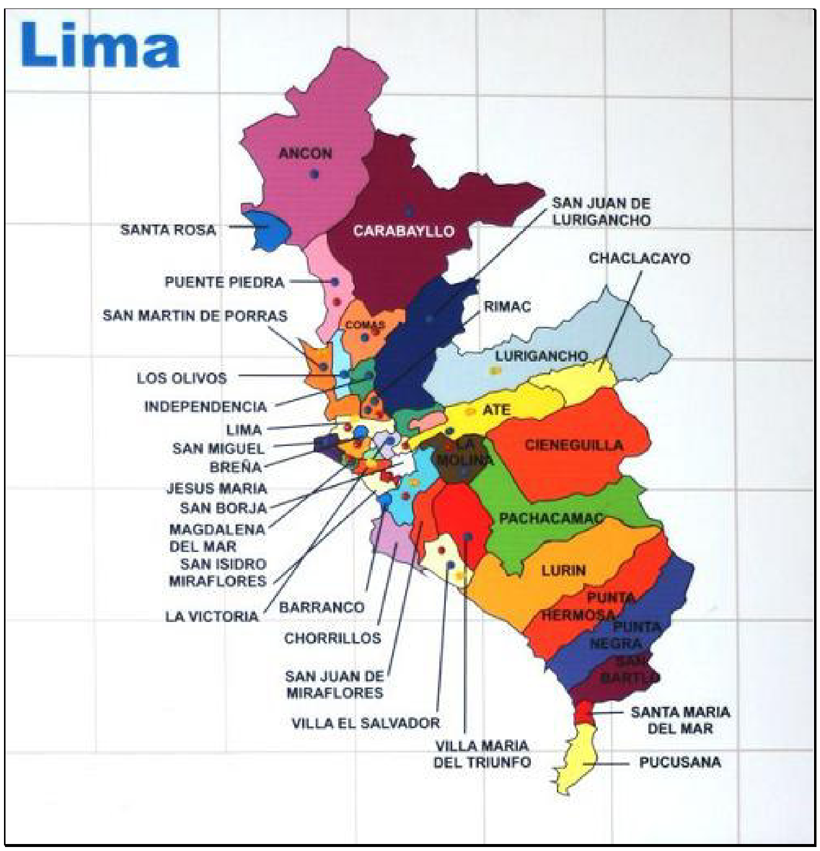
Fuente: http://**taitalindo.com.pe**

Estos procesos significan visitar a los clientes en cada uno de los puntos de la ciudad, región o el país y efectuar la entrega (existencias en la dirección consignada por el cliente) mediante asignación de los vehículos.

Para la presente investigación, se ha tomado como muestra la distribución que se realiza diariamente en el reparto o delivery a clientes en la ciudad de Lima; y el reparto de carga que se realiza semanal a empresas en la provincia y el departamento de Lima. Estos procesos son algunas de las diversas entregas que realiza la organización en sus tareas habituales.

El proceso diario de reparto en Lima Metropolitana en la región de Lima se presenta en el mapa que aparece en la figura 3.4.

Figura 3.5: Provincia de Lima



Fuente: http://enperu.about.com.pe

La provincia de Lima es una de las 11 provincias del departamento que lleva el mismo nombre. Se ubica frente al Océano Pacífico, en la costa central de la República, y en él trabajan dos Gobiernos Regionales. Ver la figura 3.5.

La provinvia de Lima, está constituida por 43 distritos, desde el Agustino en orden alfabético hasta Villa María del Triunfo, pasando por Pucusana, San Bartolo y Santa María del Mar. Ver la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Distritos de la provincia de Lima

Los distritos de Lima son en total 43:

- Agustino
- Ate Vitarte
- Ancon
- Barranco
- Barrios Altos
- Breña
- Carabayllo
- Cercado
- Chaclacayo
- Cieneguilla
- Chorrillos
- Comas
- Independencia
- Jesús María
- La Victoria
- La Molina
- Lince
- Los Olivos
- Lurín
- Magdalena del Mar
- Miraflores
- Pachacámac
- Pucusana
- Pueblo Libre
- Puente Piedra
- Punta Hermosa
- Punta Negra
- Rímac
- San Isidro
- San Bartolo
- San Borja
- San Juan de Lurigancho
- San Juan de Miraflores
- San Luis
- San Martín de Porres
- San Miguel
- Santa Anita
- Santa María del Mar
- Santa Rosa
- Surco
- Surquillo
- Villa El Salvador
- Villa María del Triunfo

Fuente: http://wiki.sumaqperu.com/es/Provincia_de_Lima

El departamento de Lima, está constituid0 por 10 provincias y 171 distritos, desde Lima hasta Lunahuaná. Ver la tabla 3.2.

La tabla de distancias entre las principales ciudades del Region/Departamento de Lima, elaborado por el INEI (teniendo como base la información proporcionada por el Ministerio de Transporte y MTC) se presenta en la tabla 3.3.

Tabla 3.2: División política del departamento de Lima

DIVISION POLITICA Capital del Departamento: Lima 10 provincias y 171 distritos.		
PROVINCIA	**CAPITAL**	**DISTRITOS**
BARRANCA	BARRANCA	5
CAJATAMBO	CAJATAMBO	5
CANTA	CANTA	7
CAÑETE	SAN VICENTE DE CAÑETE	16
HUARAL	HUARAL	12
HUAROCHIRI	MATUCANA	32
HUAURA	HUACHO	12
LIMA	LIMA	43
OYON	OYON	6
YAUYOS	YAUYOS	33
SUPERFICIE: 34,803 KM2 CLIMA: Templado y húmedo TEMPERATURA: Promedio anual 14°C DISTANCIAS: Lima - Arequipa 1,009 km Lima - Trujillo 557 km Lima - Cusco 1,154 km Lima - Tacna 1,293 km		

Fuente: http://www.perutoptours.com

Como el recurso transporte es restringido, y el tiempo para realizar otras entregas es prioritario, dentro del plazo por parte de LDSC; es en ese sentido necesario que la organizacióm, optimice su viaje en redondo, que saliendo del almacén de la empresa en la ciudad de Lima, visite los lugares indicados y retorne a su punto de partida. Este es el Problema del agente Viajero o TSP.

3.3 FORMULACIÓN DEL MODELO

Un agente viajero desea recorrer “n” ciudades, se conoce las distancias, tiempos o costo de recorrer cada par de ciudades.

El problema consiste en hallar una ruta que partiendo desde su lugar de residencia pase por cada ciudad una sola vez y regrese al lugar donde se encontraba inicialmente, utizando la menor distancia posible, el menor tiempo o el menor costo de recorrer las “n” ciudades.

Tabla 3.3: Distancias entre las principales ciudades de la región Lima

Principales Localidades	LIMA	HUARAL	CANTA	MATUCANA	CAÑETE	YAUYOS	HUACHO	OYON	BARRANCA	CAJATAMBO	HUAROCHIRI	PATIVILCA	PARAMONGA	SAYAN	CHURIN	CHANCAY	S.R.DE QUIVES	LUNAHUANA
Lima	-																	
Huaral	93	-																
Canta	103	195	-															
Matucana	76	169	179	-														
Cañete	144	237	247	221	-													
Yauyos	278	372	381	355	135	-												
Huacho	148	55	250	224	292	426	-											
Oyon	291	162	393	367	435	569	142	-										
Barranca	194	101	297	271	339	473	46	180	-									
Cajatambo	338	259	491	465	533	667	240	98	278	-								
Huarochiri	151	244	253	227	195	330	299	441	345	539	-							
Pativilca	201	109	304	278	346	480	54	187	7	285	352	-						
Paramonga	208	115	310	284	352	486	60	193	13	291	358	6	-					
Sayan	161	68	264	238	306	440	49	93	87	191	312	94	100	-				
Churin	259	129	325	299	367	501	110	32	148	130	373	155	161	61	-			
Chancay	83	10	185	159	227	361	65	172	112	270	233	119	125	79	140	-		
S.R.de Quives	63	155	40	139	207	341	210	353	257	451	213	264	270	224	322	145	-	
lunahuana	185	278	287	261	41	94	333	475	379	573	236	386	392	346	444	267	247	-

Fuente: MTC

Existe un punto de partida (el nodo 0), no existe demandas en las ciudades visitadas y no hay restricciones temporales.

El problema puede formularse como:

$$\min z = \sum_{(i,j)\in A} c_{ij}x_{ij}$$

$$s.a:$$

$$\sum_{(i,j)\in A} x_{ij} = 1, \qquad \forall i \ \in V$$

$$\sum_{(i,j)\in A} x_{ij} = 1, \qquad \forall j \ \in V$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}$$

El primer juego del conjunto de restricciones, expresa que sólo sale un arco de cada nodo (ciudad o vértice); y el segundo conjunto de restricciones expresa que exactamente llega un arco a cada nodo.

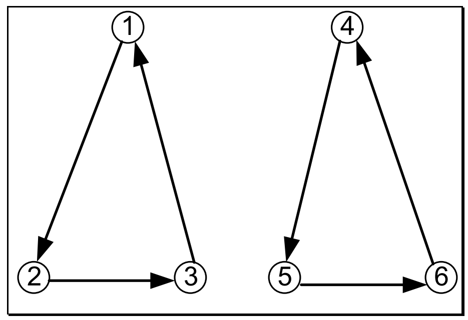
Este problema tal como se presenta, no captura todas las restricciones de un TSP o *Traveling Salesman Problem*.

Así presentado es únicamente el Problema de Asignación; es decir un TSP es un Problema de Asignación, pero lo contrario no es cierto, que un Problema de Asignación es un TSP.

En Dantzig y asociados proponen una formulación donde las variables binarias x_{ij} indican el arco $(i,j) \in A$ utilizado en la solución. El conjunto V es el conjunto de todos los nodos, donde se encuentran *i* y *j*.

Al ser un problema de asignación cualquier conjunto disjunto cíclico es la solución. Un grupo de sub-tours es un conjunto disjunto o cíclico. Ver la figura 3.6.

Figura 3.6: Solución formada por dos sub-tours



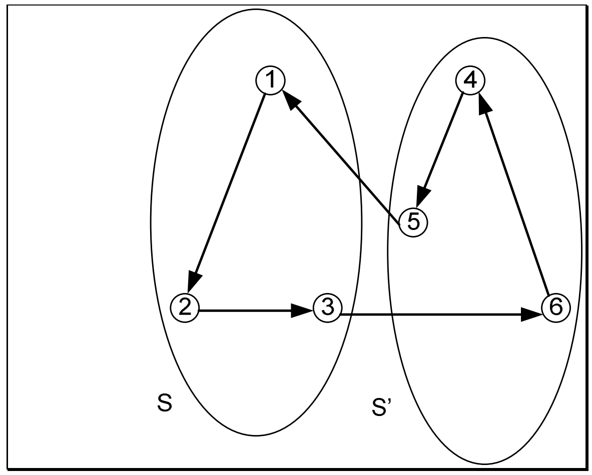
Es necesario agregar un conjunto de restricciones de contexto. Dantzig y otros, proponen una partición no trivial (S,S') y en cada partición se demanda que:

$$\sum_{\substack{i \in S \\ j \in S'}} x_{ij} \geq 1$$

Estas restricciones son denominadas de eliminación de sub-tours e indican que todo subconjunto de nodos *S* debe ser abandonado al menos una vez. Ver la figura 3.7.

La solución planteada no es práctica, puesto que necesitarían $2^{n+1} - 2$ particiones no triviales.

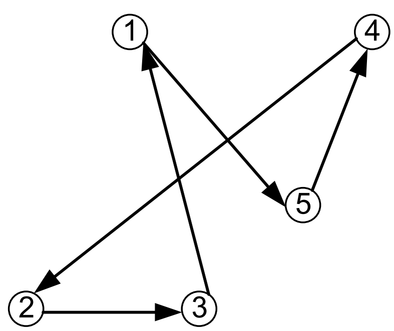
Figura 3.7: Eliminación de sub-tours



Miller, Tucker y Zemlin proponen restricciones de eliminación de sub-tours agregando variables reales $u_i, i = 1, \cdots, n$:

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, \qquad \forall(i,j) \in A, i \neq 0, j \neq 0, i \neq j$$

Figura 3.8: Tour óptimo



Para la siguiente matriz de costos $\boldsymbol{C}$, se consigue un óptimo de $z = 14.$ La ruta del TSP se muestra en la figura 3.8.

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} \infty & 10 & 5 & 6 & 3 \\ 10 & \infty & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 2 & \infty & 6 & 5 \\ 6 & 3 & 6 & \infty & 1 \\ 3 & 4 & 5 & 1 & \infty \end{pmatrix}$$

3.4 SOLUCIÓN DEL MODELO

Diariamente un vehículo sale desde la empresa en Ate Vitarte para efectuar la entrega de bienes a los distritos de Lima. La solución al modelo del agente viajero usando Programación Lineal, se presenta usando el software denominado LINGO:

```
!PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO;
!         TSP;
SETS:
    NODO/1..10/:U;
    ARCO(NODO,NODO):C,X;
ENDSETS
DATA:
     C= 100  32   22   24   33   19  22   22   18  15
         32  100  12    5   65   51  16   11    5  11
         22  12   100  17   18   14   6   10    9  10
         24   5   17  100   70   56  21   16   10  16
         33  65   18   70  100   24  14   30   25  30
         19  51   14   56   24  100  13   16   21  11
         22  16    6   21   14   13 100   13   12  13
         22  11   10   16   30   16  13  100    8   3
         18   5    9   10   25   21  12    8  100   8
         15  11   10   16   30   11  13    3    8  100;
ENDDATA
! FUNCION OBJETIVO;
MIN= @SUM(ARCO:C*X);
N= @SIZE(NODO)-1;
! RESTRICCION DE SALIDA DE CADA ARCO;
@FOR(NODO(I):
      @SUM(ARCO(I,J):X(I,J))=1;
```

```
);
! RESTRICCION DE LLEGADA A CADA ARCO;
@FOR(NODO(J):
      @SUM(ARCO(I,J):X(I,J))=1;
);
! RESTRICCION DE ELIMININACION DE SUB-TOURS;
@FOR(ARCO(I,J)|(I#GT#1)#AND#(J#GT#1):
      U(I)-U(J)+N*X(I,J)<=N-1;
);
! RESTRICCION DE VARIABLES BINARIAS;
@FOR(ARCO:
      @BIN(X);
);
```

Global optimal solution found.
Objective value: 116.0000
Extended solver steps: 47
Total solver iterations: 2580

Variable	Value	Reduced Cost
0.000000	U(1)	0.000000
0.000000		
	U(2)	5.000000
0.000000		
	U(3)	3.000000
0.000000		
	U(4)	6.000000
0.000000		
	U(5)	1.000000
0.000000		
	U(6)	0.000000
0.000000		
	U(7)	2.000000
0.000000		
	U(8)	7.000000
0.000000		
	U(9)	4.000000
0.000000		
	U(10)	8.000000
0.000000		

Detalles adicionales a la solución se presenta en el Anexo I (distancia entre los distritos), el reporte de solución de LINGO, el cual presenta los valores óptimos de la solución de las variables, y la solución óptima con el nombre verdadero de cada uno de los puntos, en el Anexo III.

La distancia total desde que sale de Ate Vitarte y luego a Pueblo Libre; y hasta regresar a Ate Vitarte, consume la cantidad de 116 kilómetros.

A continuación se trata el problema del VRP aplicado al reparto de bienes en la región Lima.

Para una semana típica, como la transcurre, han arribado las entregas para las ciudades que se muestran en la tabla 3.4, donde demanda es la cantidad de kilos a entregar. Cada vehículo, tiene capacidad para transportar 5000 kilos.

Tabla 3.4: Ciudades para el proceso en la región Lima

Ciudades	Demanda
Lima	0
Huaral	500
Cañete	1200
Huacho	1300
Barranca	1500
Chancay	700
Yauyos	800
Pativilca	1300
Matucana	700
Churín	1000

Fuente: Organización LDSC

La solución que reporta el programa LINGO, se presenta a continuación:

```
Feasible solution found.
   Objective value:                      1486.000
   Extended solver steps:                    2444
   Total solver iterations:                 26091


    Export Summary Report
    ---------------------
    Transfer Method:       OLE BASED
    Workbook:          C:\DATOS TESIS.XLS
    Ranges Specified:          1
       COSTOTOTAL
    Ranges Found:              1
    Range Size Mismatches:         0
    Values Transferred:         1


    Export Summary Report
    ---------------------
    Transfer Method:       OLE BASED
    Workbook:          C:\DATOS TESIS.XLS
    Ranges Specified:          1
       X
    Ranges Found:              1
    Range Size Mismatches:         0
    Values Transferred:        100


                        Variable           Value
                           VCAP        5000.000
                              N        10.00000
                      COSTOTOTAL        1486.000
                          Q( 1)        0.000000
                          Q( 2)        500.0000
                          Q( 3)        1200.000
                          Q( 4)        1300.000
                          Q( 5)        1500.000
                          Q( 6)        700.0000
                          Q( 7)        800.0000
                          Q( 8)        1300.000
                          Q( 9)        700.0000
                         Q( 10)        1000.000
                          U( 1)        0.000000
                          U( 2)        2200.000
                          U( 3)        2000.000
                          U( 4)        4100.000
                          U( 5)        2800.000
                           U(6)        2900.000
                          U( 7)        800.0000
                          U( 8)        1300.000
                          U( 9)        700.0000
                         U( 10)        1700.000
```

Detalles adicionales a la solución se presenta en el Anexo IV (distancia entre las ciudades, y la solución óptima). El costo total es de 1493 kilómetros.

3.5 ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

En esta sección se comenta la solución dada al problema del VRP, aplicado al proceso de entrega, que ha sido resuelto en la sección anterior.

Tabla 3.5: Demanda total en la solución óptima VRP

Rutas	Demanda Total
Lima- Yauyos-Cañete-Lima	700+1200=2900
Lima-Pativilca-Barranca-Huacho-Lima	1300+1500+1300=41000
Lima-Matucana-Churín-Huaral—Chancay-Lima	700+1000+500+700=3900

Fuente: Organización LDSC

Se observa que en cada sub-tour la cantidad transportada no excede de la capacidad del vehículo. Existiendo tres (03) sub-tours. Ver las tabla 3.5 y 3.6.

Tabla 3.6: Distancia total en la solución óptima VRP

Rutas	Distancia Total
Lima- Yauyos-Cañete-Lima	278+135+144
Lima-Pativilca-Barranca-Huacho-Lima	201+7+46+148
Lima-Matucana-Churín-Huaral—Chancay-Lima	76+229+129+10+83

Fuente: Organización LDSC

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. La hipótesis (hipótesis general), quedó validada por la obtención de la solución en la meta de elegir la ruta que minimiza el recorrido de desplazamiento en la entrega de bienes, usando investigación de operaciones.
2. La investigación de operaciones, es una buena alternativa para la solución de problemas en los procesos logísticos de distribución.
3. La herramienta de gestión planteada en el trabajo de tesis, permite obtener resultados prácticos para la labor de la distribución.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Utilizar la herramienta computacional para obtener respuestas ante situaciones de la búsqueda de la mejor ruta en los procesos de distribución.
2. La fidelidad de las distancias es muy importante para efectuar una toma de decisiones racional.
3. Hacer uso de un software como Google Map, para encontrar las distancia entre diversos puntos, cuando se utilice la herramienta de gestión para otras situaciones de fiscalización, en la región a estudiar.

4. La metodología planteada en la presente investigación, es generalizable a cualquier situación donde se necesite tomar decisiones en torno a problemas de tours óptimos.
5. La investigación de operaciones es una fuente confiable de solución a otros problemas de gestión dentro de cualquier organización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ballou, R. (2004). *Administración de la cadena de Suministro.* México: PEARSON Educación, quinta edición.
2. Chopra, Sunil, Peter Meindl (2013). *Administración de la Cadena de Suministro: Estrategia, Planeación y Operación*. México, D.F, México: PEARSON Educación de México, S.A. de C.V., quinta edición.
3. Dantzig, George, D. Fulkerson y S. Johnson. (1954). Solution of a large scale Traveling Salesman Problem, Operations Research 2, 393-410.
4. Glover, F., Kochenberg, G. (2003). *Handbook of Metaheuristics*. Massachusetts. USA: Kluwer Academic Publishers.
5. Goldberg, David (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. New York, USA: Addison-Wesley.
6. Hernandez, R., Fernandez, C. & Baptista, P. (2010) *Metodología de la Investigación*. México: Editorial Mc Graw-Hill.
7. Mitchell, Melanie. (1996). *An Introduction to Genetic Algorithms*". MIT Press.
8. McGinnis, Michael. (1990). *The Relative Importance of Cost and Service in Freight Transportation Choice: Before and After Deregulation,* Transportation Journal 30 N^0 1, 12-19.
9. Miller, C., Tucker, A., Zemlin, R. (1960). *Integer Programming formulation of Traveling Salesman Problem*, Journal of the ACM 7, 326-329.

10. Lin, S. and B. Kernighan. (1973). "*An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem*." Operations Research 21, 498–516.
11. Phillips, D., Ravindran, A., Solberg, J. (1976). *Operations Research: Principles and Practice*, John Wiley & Sons, Inc.
12. Revista LDSC (2010). "LOGISTIC S.A. es LDSC, 50 años en Operaciones Logísticas en el Perú".

FICHA TÉCNICA A UTILIZAR

LINGO

LINGO es un software de la empresa Lindo Systems Inc que permite resolver modelos matemáticos lineales y no lineales. LINGO (del inglés LINear Generalize Optimizer) es una herramienta simple para formular problemas lineales y no lineales, resolverlos y analizar su solución.

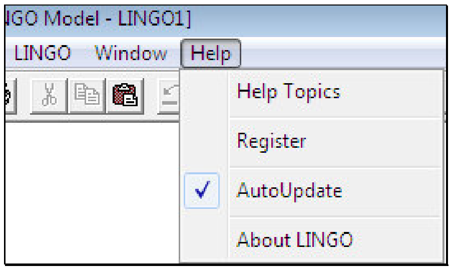
El resultado que LINGO proporciona es la optimización que ayuda a encontrar el mejor resultado: la ganancia más alta, o el costo más bajo. A menudo estos problemas involucran el uso más eficiente de los recursos. Los problemas de optimización son clasificados a menudo como lineales o no lineales, dependiendo si las relaciones en el problema son lineales con respecto a las variables.

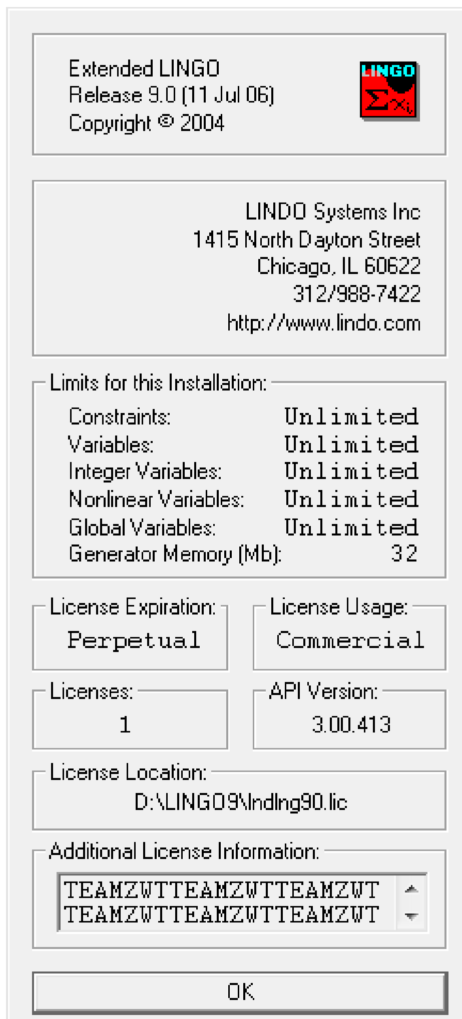
Uno de los rasgos más poderosos de LINGO es su aplicación en el lenguaje de modelo matemático. El cual permite expresar un problema de una manera muy similar a la anotación matemática normal pudiendo también, expresar una serie entera de restricciones en una declaración compacta. Los modelos son fáciles de efectuar mantenimiento.

Es importante comentar, que la versión Académica LINGO, sólo se utiliza para aplicaciones, cuya característica es el reducido uso de memoria.

Para la presente aplicación, se ha utilizado la versión Profesional; que es la que utilizan las grandes consultoras de optimización en el mundo.

Cabe comentar que se ha utilizado la versión Profesional de la consultora Know How Consulting. Y para reconocer que es la versión indicada, es importante dirigirse en la navegación al menú **Help**, que en la sección **About LINGO**, presenta las características de MEMORIA ILIMITADA.





Anexo I

Distancias entre distritos de Lima

Desde	Hacia									
	Ate Vitarte	Barranco	Breña	Chorrillos	Comas	Pueblo Libre	Rímac	San Borja	Miraflores	San Luis
Ate Vitarte	0									
Barranco	32	0								
Breña	22	12	0							
Chorrillos	24	5	17	0						
Comas	33	65	18	70	0					
Pueblo Libre	19	51	14	56	24	0				
Rímac	22	16	6	21	14	13	0			
San Borja	22	11	10	16	30	16	13	0		
Miraflores	18	5	9	10	25	21	12	8	0	
San Luis	15	11	10	16	30	11	13	3	8	0

Anexo II

Solución LINGO I

Global optimal solution found.

Objective value:	116.0000
Extended solver steps:	47
Total solver iterations:	2580

Variable	Value	Reduced Cost
N	9.000000	0.000000
U(1)	0.000000	0.000000
U(2)	5.000000	0.000000
U(3)	3.000000	0.000000
U(4)	6.000000	0.000000
U(5)	1.000000	0.000000
U(6)	0.000000	0.000000
U(7)	2.000000	0.000000
U(8)	7.000000	0.000000
U(9)	4.000000	0.000000
U(10)	8.000000	0.000000
X(1, 1)	0.000000	100.0000
X(1, 2)	0.000000	32.00000
X(1, 3)	0.000000	22.00000

X(1, 4)	0.000000	24.00000
X(1, 5)	0.000000	33.00000
X(1, 6)	1.000000	19.00000
X(1, 7)	0.000000	22.00000
X(1, 8)	0.000000	22.00000
X(1, 9)	0.000000	18.00000
X(1, 10)	0.000000	15.00000
X(2, 1)	0.000000	32.00000
X(2, 2)	0.000000	100.0000
X(2, 3)	0.000000	12.00000
X(2, 4)	1.000000	5.000000
X(2, 5)	0.000000	65.00000
X(2, 6)	0.000000	51.00000
X(2, 7)	0.000000	16.00000
X(2, 8)	0.000000	11.00000
X(2, 9)	0.000000	5.000000
X(2, 10)	0.000000	11.00000
X(3, 1)	0.000000	22.00000
X(3, 2)	0.000000	12.00000
X(3, 3)	0.000000	100.0000
X(3, 4)	0.000000	17.00000
X(3, 5)	0.000000	18.00000
X(3, 6)	0.000000	14.00000
X(3, 7)	0.000000	6.000000
X(3, 8)	0.000000	10.00000
X(3, 9)	1.000000	9.000000

X(3, 10)	0.000000	10.00000
X(4, 1)	0.000000	24.00000
X(4, 2)	0.000000	5.000000
X(4, 3)	0.000000	17.00000
X(4, 4)	0.000000	100.0000
X(4, 5)	0.000000	70.00000
X(4, 6)	0.000000	56.00000
X(4, 7)	0.000000	21.00000
X(4, 8)	1.000000	16.00000
X(4, 9)	0.000000	10.00000
X(4, 10)	0.000000	16.00000
X(5, 1)	0.000000	33.00000
X(5, 2)	0.000000	65.00000
X(5, 3)	0.000000	18.00000
X(5, 4)	0.000000	70.00000
X(5, 5)	0.000000	100.0000
X(5, 6)	0.000000	24.00000
X(5, 7)	1.000000	14.00000
X(5, 8)	0.000000	30.00000
X(5, 9)	0.000000	25.00000
X(5, 10)	0.000000	30.00000
X(6, 1)	0.000000	19.00000
X(6, 2)	0.000000	51.00000
X(6, 3)	0.000000	14.00000
X(6, 4)	0.000000	56.00000
X(6, 5)	1.000000	24.00000

X(6, 6)	0.000000	100.0000
X(6, 7)	0.000000	13.00000
X(6, 8)	0.000000	16.00000
X(6, 9)	0.000000	21.00000
X(6, 10)	0.000000	11.00000
X(7, 1)	0.000000	22.00000
X(7, 2)	0.000000	16.00000
X(7, 3)	1.000000	6.000000
X(7, 4)	0.000000	21.00000
X(7, 5)	0.000000	14.00000
X(7, 6)	0.000000	13.00000
X(7, 7)	0.000000	100.0000
X(7, 8)	0.000000	13.00000
X(7, 9)	0.000000	12.00000
X(7, 10)	0.000000	13.00000
X(8, 1)	0.000000	22.00000
X(8, 2)	0.000000	11.00000
X(8, 3)	0.000000	10.00000
X(8, 4)	0.000000	16.00000
X(8, 5)	0.000000	30.00000
X(8, 6)	0.000000	16.00000
X(8, 7)	0.000000	13.00000
X(8, 8)	0.000000	100.0000
X(8, 9)	0.000000	8.000000
X(8, 10)	1.000000	3.000000
X(9, 1)	0.000000	18.00000

X(9, 2)	1.000000	5.000000
X(9, 3)	0.000000	9.000000
X(9, 4)	0.000000	10.00000
X(9, 5)	0.000000	25.00000
X(9, 6)	0.000000	21.00000
X(9, 7)	0.000000	12.00000
X(9, 8)	0.000000	8.000000
X(9, 9)	0.000000	100.0000
X(9, 10)	0.000000	8.000000
X(10, 1)	1.000000	15.00000
X(10, 2)	0.000000	11.00000
X(10, 3)	0.000000	10.00000
X(10, 4)	0.000000	16.00000
X(10, 5)	0.000000	30.00000
X(10, 6)	0.000000	11.00000
X(10, 7)	0.000000	13.00000
X(10, 8)	0.000000	3.000000
X(10, 9)	0.000000	8.000000
X(10, 10)	0.000000	100.0000

Anexo III

Solución del agente viajero

Desde	Hacia									
	Ate Vitarte	Barranco	Breña	Chorrillos	Comas	Pueblo Libre	Rímac	San Borja	Miraflores	San Luis
Ate Vitarte										10
Barranco									6	
Breña							4			
Chorrillos		7								
Comas						2				
Pueblo Libre	1									
Rímac					3					
San Borja				8						
Miraflores			5							
San Luis								9		0

Anexo IV

Solución al VRP

VCAP	5000

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Q
1	0	93	144	148	194	83	278	201	76	259	0
2	93	0	237	55	101	10	372	109	169	129	500
3	144	237	0	292	339	227	135	346	221	367	1200
4	148	55	292	0	46	65	426	54	224	110	1300
5	194	101	339	46	0	112	473	7	271	148	1500
6	83	10	227	65	112	0	361	119	159	140	700
7	278	372	135	426	473	361	0	480	355	501	800
8	201	109	346	54	7	119	480	0	278	155	1300
9	76	169	221	224	271	159	355	278	0	229	700
10	259	129	367	110	148	140	501	155	299	0	1000

1486

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0